

# **Einfluss der Feuchtigkeitsaufnahme hybrider fibre metal laminates (FMLs) auf das mechanisch-physikalische Verhalten**

*T. Fischer*

*Clausthaler Zentrum für Materialtechnik / Technische Universität Clausthal*

*Tobias.fischer@tu-clausthal.de*

*G. Ziegmann*

*Institut für Polymerwerkstoffe / Technische Universität Clausthal*

*ziegmann@puk.tu-clausthal.de*

---

## **Abstract**

Im Zuge der weltweiten Bestrebung nach Klimaneutralität rückt die Entwicklung neuer, klimaneutraler und umweltschonender Produkte weiter in den Fokus der Forschung und Entwicklung. Eine Möglichkeit, dem steigenden CO<sub>2</sub> Ausstoß entgegen zu wirken, ist einerseits die Applikationsoptimierung herkömmlicher Werkstoffe, andererseits die Kombination mehrerer unterschiedlicher Werkstoffklassen, um hybride Materialien zu entwickeln, welche die positiven Materialeigenschaften der unterschiedlichen Werkstoffe vereinen. In der hier vorgestellten Arbeit wird ein Sandwichmaterial aus faserverstärktem Kunststoff (Halbzeug) und Metall [*fibre metal laminate* (FML)] untersucht und hinsichtlich seiner Feuchtigkeitsaufnahme und den damit verbundenen Änderungen der mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Hierbei wird vertieft auf die Wasseraufnahme sowie die interlaminare Scherfestigkeit (ILSS) der Kernmaterialien Polyamid und glasfaserverstärktes Polyamid, sowie auf die im einstufigen Herstellungsverfahren hergestellten Sandwich Proben Metall/Polyamid/Metall und Metall/glasfaserverstärktes Polyamid/Metall eingegangen. Die Untersuchungen dienen als Grundstein für den aspierten Einsatz im Automobil- und Transportsektor sowie dem Behälterbau und können als Basis weiterführender Untersuchungen genutzt werden.

---

## 1 Einleitung

Hybride Bauteile sind in einer stetigen Etablierung auf dem Markt und ersetzen, in hochfunktionalisierten Bereichen, die klassischen Werkstoffe. Besonders deutlich ist dieser Wandel im Bereich der Luftfahrt und dem Automobilsektor zu erkennen. Der von der Universität Delft entwickelte Hybridwerkstoff GLARE® (Glass Fibre Reinforced Aluminium) beispielsweise kombiniert, durch seinen Materialmix aus glasfaserverstärktem Epoxidharz (Duroplast) und Aluminium, hohe Materialfestigkeit, enorme Schlagzähigkeit und eine verbesserte Schadens- und Ermüdungstoleranz [1–3]. Anders als bei duromerbasierten Systemen, welche im Vergleich zu thermoplastbasierten Systemen ein geringeres Formgebungspotential aufweisen [3], können thermoplastbasierte Systeme einerseits in klassischen Umformprozessen verarbeitet werden (ALUCOBOND®, Litcore®, Hylite®, CAPALL®) [4–9]. Andererseits kann durch eine temperierte Umformung der thermoplastische Werkstoff in einen viskosen bzw. schmelzflüssigen Zustand überführt werden, was eine deutliche Steigerung des Formgebungspotentials mit sich bringt. Wie bei allen hybriden Materialkombinationen sind die Eigenschaften des Bauteils sowie der möglichen Verarbeitungsmethoden, durch die Wahl der Einzelkomponenten limitiert. Die thermoplastischen Kunststoffe lassen sich hierbei vereinfacht in drei Kategorien einteilen:

- Standard Kunststoffe (z.B.: PP, PE)
- Technische Kunststoffe (z.B.: PA, PC)
- Hochleistungskunststoffe (z.B.: PEEK, PTFE)

Diese drei Gruppen unterscheiden sich hinsichtlich Produktionsvolumen, Preis, mechanischen und thermischen Eigenschaften wie Steifigkeit, Schlagzähigkeit, Glasübergangs- und Schmelztemperatur. Wird als Matrixmaterial ein Polypropylen verwendet, wie in den Produkten Bondal® und Hylite®, ist eine Verarbeitung in klassischen Umformwerkzeugen mit hohen Dehnraten bei Raumtemperatur möglich. Aufgrund des vergleichsweise geringen Schmelzpunktes, ist die maximale Einsatztemperatur aber auf 120°C bzw. kurzzeitig auf 150°C limitiert [5]. Wird als Matrixmaterial ein technisches bzw. technisch hochwertiges Polymer wie Polyamid 6 verwendet, können höhere mechanische und thermische Eigenschaften erzielt werden, was sich aber wiederum auf die Herstellungs-, Verarbeitungsmethoden sowie das Bauteil auswirkt. Auch wirkt sich die Wahl des Matrixmaterials insofern auf die Produkteigenschaften aus, dass sich andere Oberflächenanbindungen zwischen Matrix und metallischer Deckschicht einstellen. In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass sich aufgrund der funktionellen polaren Gruppen des Polyamids, vorwiegend in den amorphen Bereichen mit erhöhtem freien Volumen, eine Feuchtigkeitsaufnahme einstellt [10]. Eine Faserverstärkung wie

sie in den Produkten GLARE® und CAPALL® vorhanden ist, bewirkt einerseits eine deutliche Steigerung der mechanischen Eigenschaften sowie eine last- und gewichtsoptimierte Auslegung des Produktes. Andererseits wird eine weitere Komponente in den Verbund eingebracht, welche ebenfalls limitierende Einflüsse mit sich bringt [11,12]. Es muss beispielsweise sichergestellt werden, dass eine gute Anbindung zwischen Faser und Matrix möglich ist, andererseits ist durch die Faserverstärkung und die damit einhergehende geringe Bruchdehnung, das Umformpotential des Produktes - in klassischen - nicht temperierten Umformwerkzeugen nur bedingt möglich. Ein Auszug typischer Kunststoffmatrixes, welche in FML verwendet werden, ist in *Tabelle 1* dargestellt.

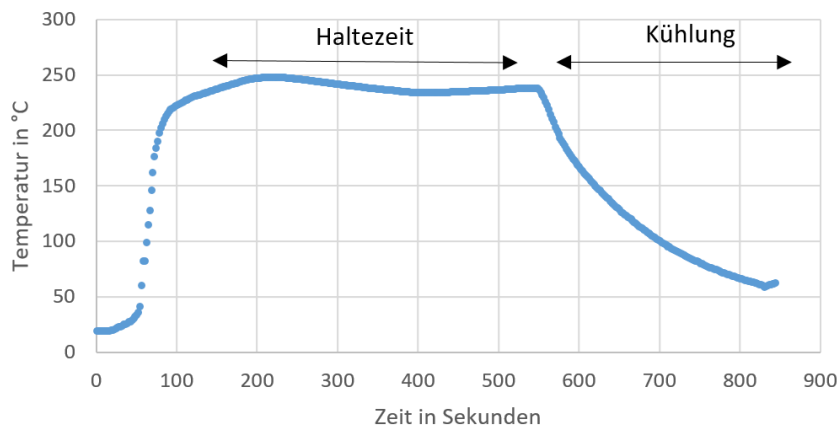
*Tabelle 1 Auswahl thermoplastischer FML*

Kunststoffmatrix	Kommerzielle Anwendung	E-Modul Kunststoff in N/mm <sup>2</sup>	Glasübergangstemperatur in °C	Schmelztemperatur in °C
Polypropylen	Hylite, Bondal	1300 bis 1800	0 bis 20	160 bis 165
Polyethylen	Alucobond	210 bis 1400	-100 bis -10	105 bis 135
Polyamid 6	Capaal	2600 bis 3200	50 bis 80	220 bis 225

[5,8,13]

## 2. Materialauswahl

Zur Charakterisierung der Feuchtigkeitsaufnahme sowie deren Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften des Polyamid 6 wurden einerseits Probenplatten aus Polyamid 6 (PA) sowie glasfaserverstärktem Polyamid 6 (PA-GF) hergestellt, diese dienen als Referenzmessung. Andererseits wurden Sandwichplatten aus metallischer Deckschicht mit Polyamid 6 (Sandwich PA) sowie metallischer Deckschicht und faserverstärktem Polyamid 6 (Sandwich PA-GF) hergestellt. Das Ausgangsmaterial der PA-GF Proben ist ein vorgefertigtes Halbzeug der Firma Lanxess: Tepex dynalite (102-RG600(2)/47 vol-%), Materialstärke 0,5 mm. Als Ausgangsmaterial für die Polyamidproben wurde Folienware der Firma Infiana Germany GmbH & Co. KG verwendet, Materialstärke 0,5 mm. Die Proben wurden in einer temperierten Heißpresse, Presskraft 12 kN und einer Probeneinlegetemperatur 245 °C hergestellt. Zur Plastifizierung des Kunststoffes wurden die Proben bei 245 °C für 5 min. gehalten. Anschließend wurden die Proben unter konstanter Presskraft auf 60°C abgekühlt ( $t_{60^\circ\text{C}}=4:30$  Minuten) siehe *Abbildung 1*.



*Abbildung 1 Temperaturverlauf Probenherstellung*

Um die Anbindung zwischen metallischer Deckschicht und Polymermatrix zu steigern, wurde die metallische Deckschicht separat bei 440 °C getempert, dies bewirkt eine Oxidation der Oberfläche und somit eine homogene Grenzschicht [12]. Als Deckschicht wurde ein verzinkter Stahl (Materialnr.: 1.0375 der Firma Thyssenkrupp-Rasselstein GmbH mit einer Materialstärke von 0,42 mm verwendet [11,12]. Des Weiteren wurde ein Haftvermittler, auf Basis eines modifizierten Polyamids aufgebracht (SI-Coatings 310027 – 50L) [12,15]. Da es sich bei Polyamid 6 um einen teilkristallinen Kunststoff handelt und die Kristallinität Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundes sowie auf die Feuchtigkeitsaufnahme hat, wurden alle Proben unter identischen Abkühlbedingungen hergestellt [16], um möglichst konstante Kristallisationsgrade zu bewirken.

### *2.1 Feuchtigkeitsaufnahme*

Die Charakterisierung der Feuchtigkeitsaufnahme wurde anhand von quadratischen Platten mit einer Kantenlänge von 100 mm und einer Höhe von 2 mm durchgeführt. Parallel zu den Platten, wurde die Feuchtigkeits-, bzw. Gewichtszunahme an ILSS-Proben, mit geringeren Abmessungen (10 mm x 20 mm x 2 mm), dokumentiert. Aufgrund des geänderten Schnittkantenverhältnisses zwischen Platten und ILSS-Proben, ist von einer deutlich schnelleren Sättigung auszugehen.

Zu Beginn der Messung wurden die Proben bei 80 °C getrocknet und die Masse bestimmt. Die Lagerung und damit verbundene Feuchtigkeitsaufnahme erfolgte unter konstanten Bedingungen von 70 °C und 85 % relativer Luftfeuchte in einer Klimakammer, Klimaprüfschrank Discovery, Typ: DY200 C. Die Probennahme und die damit verbundene gravimetrische Bestimmung der Feuchtigkeitsaufnahme erfolgte in Messreihe I

nach: 0,2,4,8,24,48,120,144,168 und 192 h. In Messreihe II wurde sich auf die Feuchtigkeitsaufnahme der ILSS-Proben im Bereich zwischen 0 und 48 h fokussiert, die Probenahme erfolgte nach: 0,3,6,10,24,30,48 h. Der kurze Messbereich wurde aufgrund der Feuchtigkeitszunahme der ILSS-Proben gewählt, da diese durch das größere Oberflächen zu Volumenverhältnis, die maximale Sättigung schneller erreichen.

In *Tabelle 2* sind die untersuchten Probenkörper der quadratischen Platten zur Bestimmung der Feuchtigkeitsaufnahme aufgelistet. Durch die Verwendung von Abstandsblechen (2.1 mm) konnte eine einheitliche Probenstärke erreicht werden. Geringe Schwankungen sind aber aufgrund der Materialkombinationen nicht zu vermeiden.

*Tabelle 2 Probenaufbau Feuchtigkeitsaufnahme, Platte 100x100x2mm*

Probenbezeichnung	Lagenaufbau in mm	Geplante Materialstärke in mm	Gemessene Materialstärke in mm
PA	4x0,5	2	2,2
PA-GF	4x0,5	2	2,1
Sandwich PA	0,42/3x0,5/0,42	2,3	2,1
Sandwich PA-GF	0,42/3x0,5/0,42	2,3	2,1

## 2.2 Interlaminare Scherfestigkeit

Die mechanische Untersuchung der Feuchtigkeitseinflüsse erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 14130, Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken [17]. Die Probengeometrie ist 10 mm x 20 mm x 2 mm wobei die Höhe, je nach Probenaufbau und verwendeten Material bzw. Sandwichaufbau leicht abweicht. Dieser Prüfaufbau wurde gewählt, um den Einfluss auf das Versagen der Anbindung zwischen Kunststoffmatrix und Glasfaser bzw. zwischen metallischer Deckschicht und Kunststoffmatrix zu bestimmen. Die mechanischen Untersuchungen wurden in **Messreihe II** zusammen mit der Bestimmung der Feuchtigkeitsaufnahme nach: 0,3,6,10,24,30,48 h durchgeführt. Da bei dieser Messmethode selbst kleinste Fehlstellen in der Anbindung, sowie eine leichte Verschiebung beim Einlegen der Probe in die Prüfeinrichtung zu großen Schwankungen der Messergebnisse führt, wurden pro Reihe 7 Proben getestet. Untersucht wurden die Proben: PA-GF, Sandwich PA-GF, sowie Proben bei denen die metallische Deckschicht mechanisch aufgeraut (Bürsten) wurde, Sandwich PA-GF mech., um die Haftung zu erhöhen. Als Prüfeinrichtung, für die mechanischen Untersuchungen, wurde eine Zug-/Biegeprüfmaschine der Firma Zwick Roell vom Typ: BZ2-MM100TL.ZW01 verwendet. Untersucht

wurde einerseits die maximale Kraft bis zum Einsetzen des interlaminaren Bruchs, andererseits wurde die sich ändernde scheinbare Steifigkeit, mit zunehmender Feuchtigkeit der Proben charakterisiert.

In *Tabelle 3* sind die untersuchten Probenkörper der Interlaminaren Scherfestigkeits (ILSS)-Probenkörper dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich die geplante Materialstärke von 2 mm, welche für die ILSS-Proben benötigt wird leicht geändert hat. Die gemessene Materialstärke ist hierbei ein über die 49 Proben (7 Messungen à 7 Proben) gebildeter Mittelwert. Besonders deutlich ist dies an den PA-GF Proben zu erkennen, durch das Plastifizieren des Kunststoffes während des Heizpressens, erfolgt ein Auspressen in den Randbereichen der Proben. Eine exakte Probenherstellung ist daher nur bedingt möglich. Die daraus resultierende Dickenänderung wurde in der Auswertung berücksichtigt. Auf die Herstellung von PA-Proben sowie der Sandwichkombination mit PA wurde daher verzichtet, auch ist ein interlaminarer Bruch der reinen PA-Proben nicht zu erwarten. Eine Verwendung von Abstandsblechen, wie sie in der Probenreihe zur Ermittlung der Feuchtigkeitzunahme verwendet wurde, welche eine deutlich homogenere Materialstärke ermöglichen, wurde aufgrund einer Schwächung der Anbindung nicht verwendet.

*Tabelle 3 Probenaufbau ILSS-Proben, 20x10x2mm*

Probenbezeichnung	Lagenaufbau in mm	Geplante Materialstärke in mm	Gemessene Materialstärke in mm
PA-GF	4x0,5	2	1,66
Sandwich PA-GF	0,42/3x0,5/0,42	2,3	2,2
Sandwich PA-GF mech.	0,42/3x0,5/0,42	2,3	2,3

### **3 Ergebnisse und Diskussion**

#### *3.1 Feuchtigkeitsaufnahme ebene Platte*

*Abbildung 2* zeigt die Feuchtigkeitsaufnahme der vier untersuchten Materialien bzw. Materialkombinationen: PA, PA-GF, sowie die Hybridverbunde Sandwich PA und Sandwich PA-GF.

Zu beachten sind hierbei die unterschiedlichen Diffusionswege. Bei den Proben aus PA und PA-GF kann von einer eindimensionalen Diffusion ausgegangen werden. Das Oberflächenverhältnis der Schnittkante (2x100 mm) zur Grundfläche (100x100 mm) beträgt dabei 0,04. Wohingegen bei den Sandwichproben, die Diffusion nur über die Schnittkanten erfolgt und damit nur in Lagenebene erfolgt.

Die Feuchtigkeitsaufnahme wurde bei den untersuchten Proben auf den Polymeranteil bezogen. Hierzu wurde bei den Sandwichproben die metallische Deckschicht mechanisch entfernt und der Faservolumen- bzw. Fasermassenanteil, des Sandwichkerns bestimmt. Es wird angenommen, dass die Deckschicht sowie die Glasfaser keinen wesentlichen Anteil an der Feuchtigkeitsaufnahme haben.

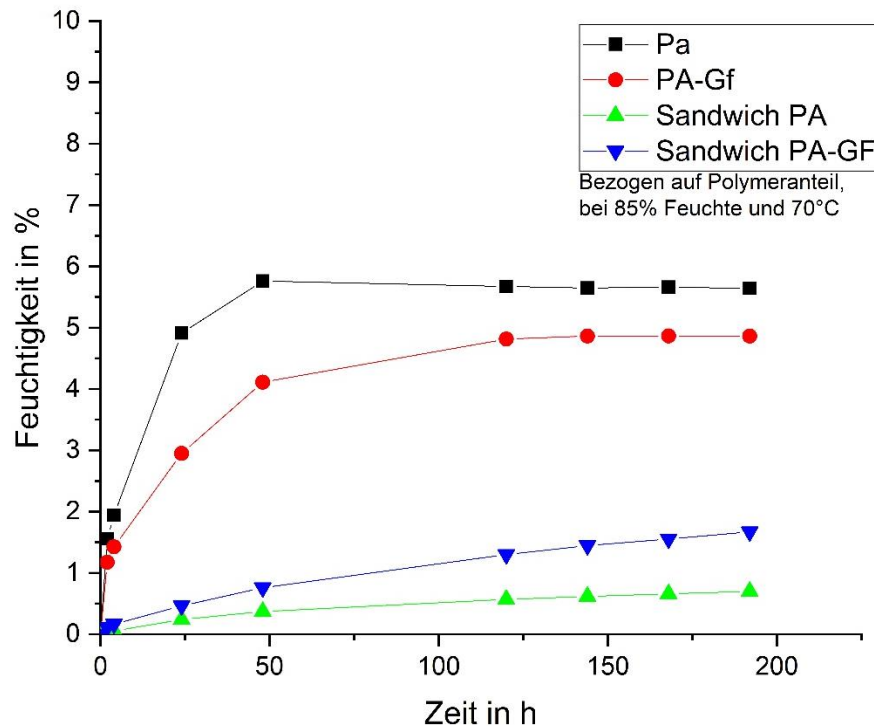


Abbildung 2 Feuchtigkeitsaufnahme ebene Platte

Vergleicht man in *Abbildung 2* das Erreichen der Sättigung von den Proben PA (48 h) und PA-GF (144 h) ist zu erkennen, dass die Glasfaser in z-Richtung die Diffusionsgeschwindigkeit erniedrigt und als Diffusionsbremse wirkt [18]. Stellt sich hingegen eine Diffusion über die Schnittkanten wie in Probe Sandwich PA-GF ein (x,y-Richtung), ist eine Diffusion entlang der Grenzschicht zwischen der Faser und der Matrix zu beobachten, welche die Diffusion begünstigt [19]. Dies zeigt sich im Vergleich zur Probe Sandwich PA. Zu erwarten wäre ein ähnliches Verhalten wie in den Kunststoffproben, die Probe Sandwich-PA nimmt die Feuchtigkeit schneller auf als die Probe Sandwich-PA-GF, da die Feuchtigkeit aber entlang der Grenzschicht zwischen Polyamid und der Glasfaser wandert, nimmt die Sandwichprobe PA-GF schneller die Feuchtigkeit aus der Umgebung auf. Aufgrund der Orthotropie des faserverstärkten Kunststoffes (PA-GF) sind die hier vorgestellten Werte als strikt richtungsabhängig zu bewerten.

Ein Erreichen der Sättigung, könnte unter den gewählten Versuchsbedingungen, für die Sandwichproben in einer überschaubaren Zeit nicht erreicht werden. Außerdem ist zu erkennen, dass sich die (maximale) Feuchtigkeitsaufnahme zwischen den Proben PA und PA-GF sowie zwischen den Proben Sandwich PA und Sandwich PA-GF unterscheidet. Dieses Verhalten beruht auf unterschiedlichen Effekten. Wie bereits oben diskutiert

sind die Randbedingungen bei reinem PA bzw. PA-GF anders als bei Sandwichproben mit metallischen Deckschichten. Bei den reinen Kernproben (PA, PA-GF) definiert die Matrix das Diffusionsverhalten. Die Faserverstärkung verringert die Diffusionskoeffizienten.

Eine rechnerisch ermittelte geringere Feuchtigkeitsaufnahme kann auf Unterschiede im Kristallisationsgrad [16] oder auf leicht unterschiedliche Molmassenverteilungen zurückgeführt werden. Es kann aber konstatiert werden, dass beide Kurven zu einer ähnlichen Feuchtigkeitsaufnahme führen. Bei Sandwichsystemen mit einer kleineren Diffusionsfläche (Schnittkante) für die Feuchtigkeitsaufnahme, ist die Geschwindigkeit bei reinem Polyamid eine Funktion des Diffusionskoeffizienten im PA. Faserverstärktes PA-GF dagegen wird über die Grenzfläche Faser-Matrix die Feuchtigkeitsaufnahme-geschwindigkeit definieren, deshalb liegt diese Kurve in *Abbildung 2* über der reinen PA Sandwichprobe.

Die Ermittlung eines Diffusionskoeffizienten für die eindimensionale Diffusion ist nach [18] möglich. Berechnet wurde der Diffusionskoeffizient (D) für die Proben PA und PA-GF, über den Mittelwert im linearen Bereich nach Formel:

$$D = \frac{\pi}{16} \left( \frac{M_1 * t}{M_{Max}} \right)^2 \frac{1}{\tau_1}$$

mit  $t$ =Dicke der Probenplatte in mm,  $M$ =Feuchtegehalt und  $\tau$  Zeit in Sek.

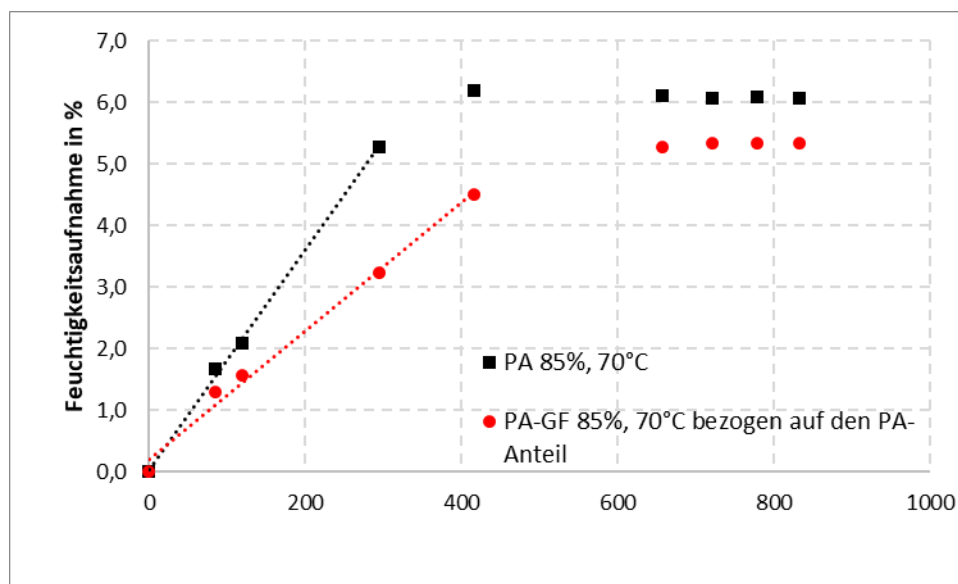


Abbildung 3 Berechnung Diffusionskoeffizient

Tabelle 4 Diffusionskoeffizient

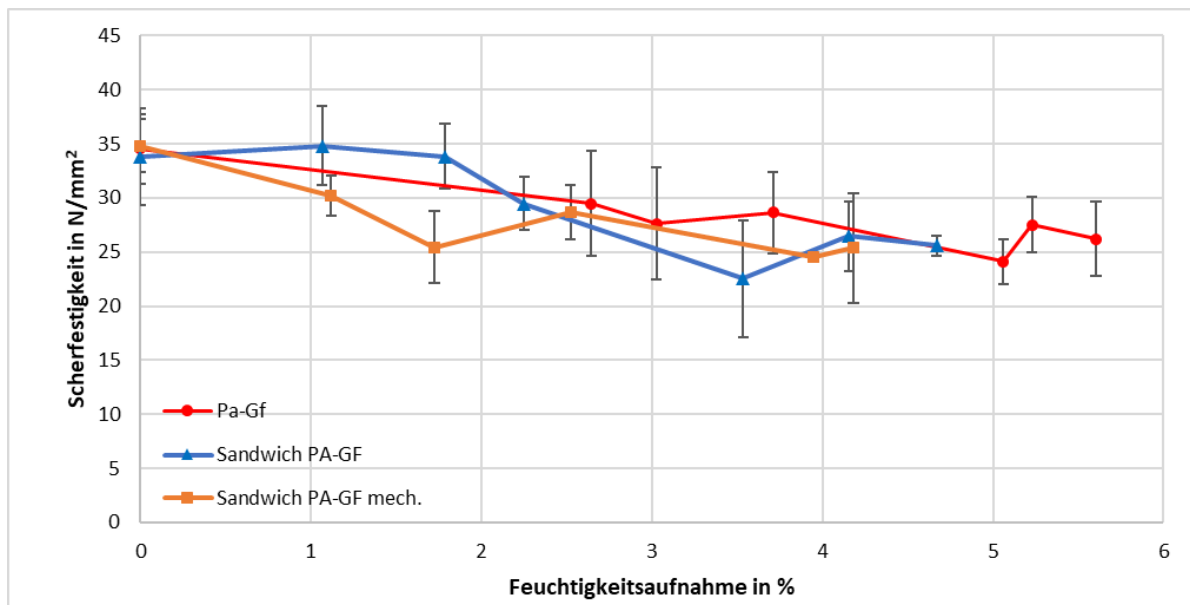
Probe	Sättigungsfeuchte in %	D in mm <sup>2</sup> /s
PA	6,09	8,80E-06
PA-GF	5,33	5,02E-06



In *Tabelle 4* und *Abbildung 3* sind die Berechnungsdaten und der berechnete Diffusionskoeffizient für die Proben PA und PA-GF dargestellt. Zu beachten ist, dass es sich beim Diffusionskoeffizient der PA-GF Probe, um die z-Richtung, senkrecht zum Verstärkungsgewebe handelt. Die ermittelten Werte decken sich gut mit den in [19] präsentierten Ergebnissen, in denen ebenfalls ein Polyamid 6 sowie kurzfaserverstärktes Polyamid 6 untersucht wurden.

### 3.2 Interlaminare Scherfestigkeit

Der Einfluss der Feuchtigkeit auf die Scherfestigkeit ( $\tau_{\text{Bruch}}$ ) ist in *Abbildung 4* dargestellt. Hierzu wurden die Mittelwerte der untersuchten Proben gebildet und die Standardabweichung berechnet.



*Abbildung 4 Scherfestigkeit*

Eine tendenzielle Abnahme der Scherfestigkeit bei zunehmender Feuchtigkeit der untersuchten Materialien ist zu erkennen. Das sich einstellende Versagensbild der Sandwichproben entspricht einem Mischbruch mit dominierendem adhäsiven Versagen zwischen Metall und Haftvermittler, mit sequentiell auftretenden kohäsiven Versagensbereichen im Haftvermittler sowie sequentiell adhäsiven Versagen zwischen Polymer und Haftvermittler. Bestimmt wurde das Versagensverhalten mittels mikroskopischer Untersuchungen sowie rasterelektronenmikroskopischer (REM) Aufnahmen.

Die Kraft-/Wegverläufe der ILSS Messung für die PA-GF Proben sind in *Abbildung 5* dargestellt. Zu erkennen ist ein ähnliches Verhalten wie in *Abbildung 4*, mit steigender Feuchtigkeitsaufnahme nimmt die Kraft, welche die Probe aufnehmen kann ab. Bei der dargestellten Abbildung handelt es sich, wie auch bei den folgenden Abbildungen, um gemittelte Verläufe (sieben Proben pro Kurve), bis zum Einsetzen des Versagens der ersten Probe. Die Dehnung kann in diesem Zusammenhang nicht bewertet werden, auch ist eine Aussage über den Schubmodul, aufgrund des gewählten Prüfaufbaus und der Prüfmethode nicht möglich. Die Interpretation der scheinbaren Schersteifigkeit in *Ab-*

Abbildung 5 zeigt keinen wesentlichen Einfluss der Feuchtigkeit im Bereich kleiner Verschiebungen (0-0,1 mm), da die Verstärkungsfasern mit einem Faservolumengehalt von 49 %, die Verbundsteifigkeit dominiert. Bei größeren Deformationen ist der Einfluss des viskoelastischen Verhaltens zu erkennen, der durch die Feuchteaufnahme jeweils eine stark abflachende der Kurve zeigt.

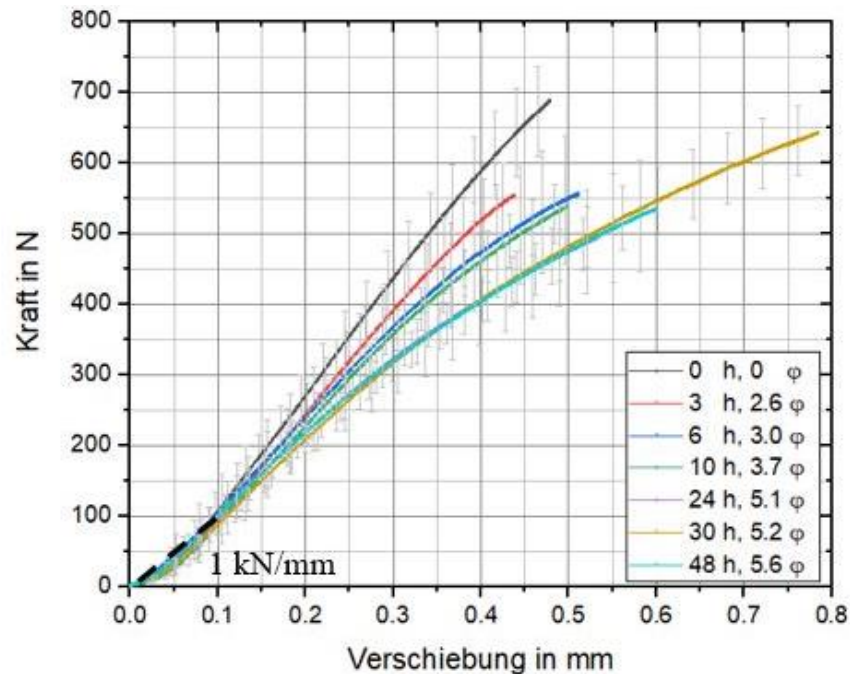


Abbildung 5 Kraft-/Wegverlauf der ILSS-Messung PA-GF

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die ILSS-Messungen der Sandwichproben PA GF.

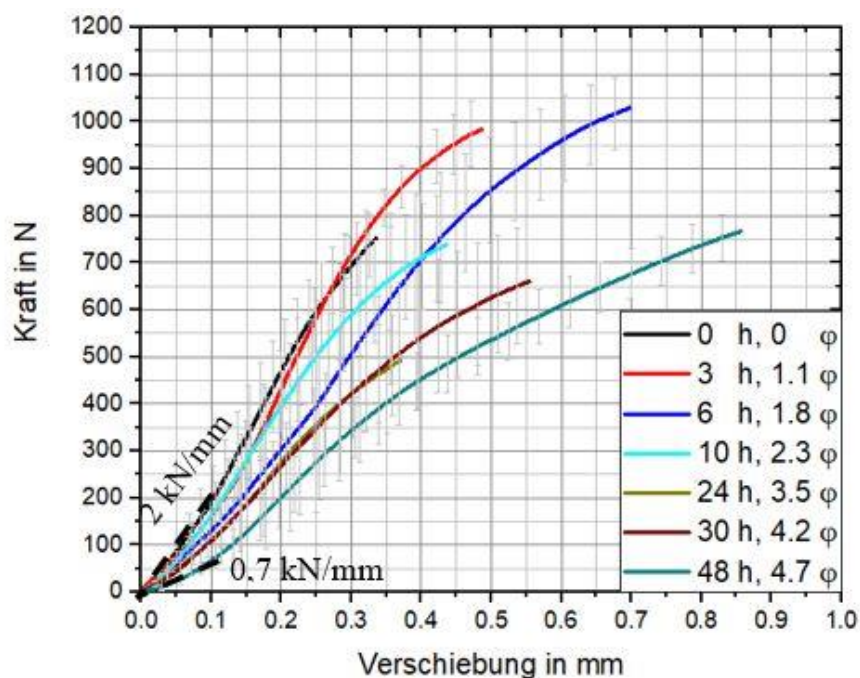
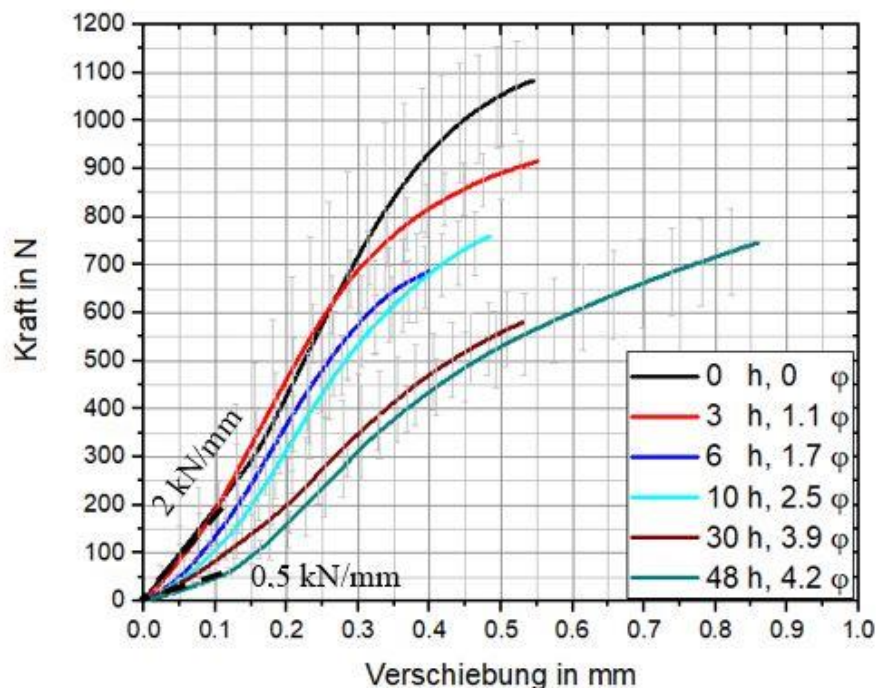


Abbildung 6 Kraft-/Wegverlauf der ILSS-Messung Sandwich PA-GF

Es ist zu erkennen, dass durch die Kombination aus faserverstärktem Kunststoff und metallischer Deckschicht tendenziell höhere Festigkeiten erreicht werden können. Auch ist ein deutlicher Einfluss auf die scheinbare Steifigkeit des Sandwiches durch die Feuchtigkeitszunahme der Probe zu erkennen. Dieser liegt zwischen einer Probe mit Polymerfeuchte vom 4,7 % und einer Probe mit 0 % Feuchte etwa bei Faktor 3. Ein direkter Vergleich zwischen den Proben aus PA GF und dem Sandwich PA GF ist nicht möglich, da sich aufgrund der metallischen Deckschicht eine andere Scherbelastung bzw. Spannungsverlauf einstellt. Anders als bei den Proben PA GF, zeigt sich im linear elastischen Bereich sowie im plastischen Bereich ein Einfluss der Feuchtigkeit. Korreliert man dies mit dem Bruchverhalten der Probe, kann vermutet werden, dass die Feuchtigkeit Einfluss auf den polyamidbasierten Haftvermittler und somit auf die scheinbare Steifigkeit hat. Auch ein Eindringen von Feuchtigkeit über die Grenzfläche zwischen Metall und Haftvermittler ist nicht auszuschließen und kann fertigungsbedingt auftreten. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch in den Proben mit mechanischer Oberflächenbehandlung der Deckschicht, dargestellt in *Abbildung 7*.



*Abbildung 7 Kraft-/Wegverlauf der ILSS-Messung Sandwich PA-GF mit mechanischer Vorbehandlung (Bürsten)*

#### 4 Zusammenfassung

Die Feuchtigkeitsaufnahme konnte für die Materialien Polyamid, glasfaserverstärktes Polyamid sowie die hybriden Sandwiches aus metallischer Deckschicht und Polyamid bzw. glasfaserverstärktem Polyamid bestimmt werden. Wie zu erwarten, stellte sich die Sättigung der Polyamid Probe als erstes nach 48 h ein. Das glasfaserverstärkte Polyamid, Köper 2/2-Gewebe, erreichte nach 144 h die Sättigung, bei einer Diffusion über die Z-Ebene, senkrecht zum Verstärkungsgewebe. Die Ermittlung eines Diffusionskoeffizienten für Polyamid 6 erfolgte nach [18], mit einem Wert von  $8,08 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ . Für das glasfaserverstärkte Halbzeug konnte ein Diffusionskoeffizient von  $5,02 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$

ermittelt werden. Zu beachten ist hierbei, dass es sich bei dem glasfaserverstärktem Material, aufgrund der Orthotropie des Materials, um den Diffusionskoeffizienten in Z-Richtung handelt. Aufgrund der nicht erreichten Sättigung der Sandwichproben, Diffusion nur über die Schnittkanten, wurde die Ermittlung eines Diffusionskoeffizienten verworfen und lediglich das Verhalten der Feuchtigkeitsaufnahme beschrieben.

Die mechanischen Untersuchungen des Einflusses der Feuchtigkeit auf glasfaserverstärktes Polyamid sowie die Sandwiches aus metallischer Deckschicht und glasfaserverstärktem Polyamid zeigten, wie erwartet, dass die Scherfestigkeit mit steigender Feuchte abnimmt, unabhängig vom Material und der Vorbehandlung. Die Scherfestigkeit fällt im Mittel auf 75 % im Vergleich zur trockenen Probe ab. Stärker ist der Einfluss der Feuchtigkeit auf die scheinbare Schersteifigkeit in *Abbildung 6*, beispielsweise ist hier die Kombination Sandwich PA-GF zu nennen, bei der sich eine Verringerung der Eigenschaften von bis zu 65 % zeigte.

Weiterführend sollten Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Feuchtigkeit auf die Grenzfläche zwischen metallischer Deckschicht und Polymer bzw. Haftvermittler durchgeführt werden, um die aufgetretenen Materialeigenschaften gezielter charakterisieren zu können.

### **Danksagung**

Dank gilt Herrn Ali Zgheib, der als studentische Hilfskraft die Herstellung der Proben und die experimentelle Durchführung unterstützt hat, als auch Herrn Wei Hua vom Institut für Metallurgie der TU Clausthal, für die Unterstützung der Heizpressversuche. Außerdem gilt mein Dank der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), Projektnr.: 330043166 für die Förderung des Projektes.

### **Literatur**

- [1] Borchard-Tuch C. Neue Werkstoffe für den Airbus A380. Chem. Unserer Zeit 2006;40(6):407–9. <https://doi.org/10.1002/ciuz.200690077>.
- [2] Banat D, Mania R. Failure analysis of thin-walled GLARE members during buckling and post-buckling response: Proceedings of the 15th Stability of Structures Symposium. AIP Conference Proceedings 2060 2019:20001. <https://doi.org/10.1063/1.5086132>.
- [3] Sinke J. Manufacturing of GLARE Parts and Structures. Applied Composite Materials 2003;10(4/5):293–305. <https://doi.org/10.1023/A:1025589230710>.
- [4] 3A Composites GmbH. Alucobond Product Information: Transport & Industry.
- [5] 3A Composites GmbH. Hylite: Die Leichtigkeit im Alu-Look. Data sheet;2019.
- [6] Burchitz I, Boesenkool R, van der Zwaag S, Tassoul M. Highlights of designing with Hylite – a new material concept. Materials & Design 2005;26(4):271–9. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.06.021>.

- [7] ThyssenKrupp Steel Europe. Leichtbau mit Stahl: LITECOR: Steel Europe geht ins Rennen; Available from: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung-6552.html>.
- [8] Nestler D, Jung H, Arnold S, Wielage B, Nendel S, Kroll L. Thermoplastische Hybridlamine mit variabler Metallkomponente. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 2014;45(6):531–6. <https://doi.org/10.1002/mawe.201400259>.
- [9] Nestler D, Trautmann M, Wagner G. Funktionalisierte hybride Lamine auf Thermoplastbasis. *Lightweight Design* 2015(4):20–5.
- [10] Hansjürgen Saechtling (ed.). *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*, 30. Aufl.
- [11] Fischer T, Grubenmann M, Harhash M, Hua W, Heingärtner J, Hora P et al. Experimental and numerical investigations on the quasi-static structural properties of fibre metal laminates processed by thermoforming. *Composite Structures* 2021;258:113418. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113418>.
- [12] Hua W, Fischer T, Harhash M, Ziegmann G, Palkowski H. Study on processing galvanized steel/PA6 sandwich composites by hot-pressing: Influence of interface properties and surface treatment on the adhesion strength. *Composite Structures* 2020;236:111779. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111779>.
- [13] ThyssenKrupp Plastics Austria. Alu-Verbundplatten: Leicht und vielseitig.
- [14] Thyssen Krupp Steel Europe AG. Technische Daten für LITECOR® C: Werkstoffaufbau LITECOR®;2015.
- [15] Hühoco Group. Material Data Sheet 310027 - 50 L.
- [16] Fischer T, Hua W, Palkowski H, Ziegmann G. Influence of the cooling rate on the adhesive properties of polyamide-6-galvanized-steel-hybrids in a one-step forming process. In: *ICCM22 Conference Proceedings 2019*. Melbourne, VIC: Engineers Australia 2019:4491–501.
- [17] DIN EN ISO 14130:1998-02, Faserverstärkte Kunststoffe\_- Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken (ISO\_14130:1997); Deutsche Fassung EN\_ISO\_14130:1997. Berlin: Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/7433990>.
- [18] Schürmann H. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden: Mit 39 Tabellen*. 2nd ed. Berlin: Springer; 2007.
- [19] Carrascal I, Casado JA, Polanco JA, Gutiérrez-Solana F. Absorption and diffusion of humidity in fiberglass-reinforced polyamide. *Polym. Compos.* 2005;26(5):580–6. <https://doi.org/10.1002/pc.20134>.

## **Autorenanschriften**

Tobias Fischer

Technische Universität Clausthal

Clausthaler Zentrum für Materialwissenschaften

Agricolastraße 6

38678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: 05323-722487

Telefax: 05323-722353

E-Mail: tobias.fischer@ tu-clausthal.de

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann

Technische Universität Clausthal

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

Agricolastraße 6

38678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: 05323-722090

Telefax: 05323-722353

E-Mail: ziegmann@puk.tu-clausthal.de